

## 반용융 알루미늄 재료의 압축성형시 변형율속도가 미시적거동에 미치는 영향

강 충 길\* · 김 기 훈\*\*

(1997년 6월 9일 접수)

### The Effect of Strain Rate on Macroscopic Behaviour in Compression Forming of Semi-Solid Aluminum Alloy

C. G. Kang and K. H. Kim

#### Abstract

The behaviour of alloys in the semi-solid state strongly depends on the imposed stress state and on the morphology of the phase which can vary from dendritic to globular. To optimal net shape forging of semi-solid materials, it is important to investigate for material behaviour for variation of strain rate. Therefore, to investigate the effect of compression speed on deformation of aluminum alloy with globular microstructure, the compression test for semi-solid aluminum alloy with controlled solid fraction is perform by material test system which is attracted with furnace. The behavior of semi-solid aluminum alloy were discussed for the various solid fraction and die speed. The material constants in stress-strain were are also proposed.

**Key Words** : Semi-solid materials(반용융재료), Solid fraction(고상율), Semi-solid forging(반용융단조).

#### 1. 서 론

알루미늄을 이용한 경량화부품의 개발은 주로 액체상태로부터 복잡한 형상의 부품을 직접 제조하는 다이캐스팅이나 용탕단조법을 이용하며, 고강도를 요하는 부품을 제조할 때에는 단조공정을 행한다. 다이캐스팅과 용탕단조법은 내부에 편석, 기공, 금형의 과열로 인한 수명 단축등이 문제가 되며, 단조품은 기계적 성질은 우수하나 프레스용량의 증대, 금형수명 및 가공한계성의 제한때문에 응용이 제한되어 있다. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로는 원소재로부터 직접 최종형상에 가장 가까운 부

품을 성형하는 반용융재료에 대한 가공법이 많은 관심의 대상이 되고 있다.

반용융가공법은 재료를 액상선과 고상선사이의 온도로 유지하면서 강한 교반을 가하여 슬러리를 제조한 후에 응고를 시켜 소재를 제조한다. 제조되어진 소재를 재가열하여 고액공존상태에서 최종부품을 제조하는 방법이다.

반용융가공은 구상화 조직상태에서 제품을 제조하기 때문에 내부에 존재하는 편석 등을 감소시킬 수 있다. 기존의 단조공정에 비해 변형저항이 작아 성형이 용이하며, 적은 하중으로도 가공한계성을 증대시킬 수가 있어 에너지 절감과 가공기계설비의 소형화가 가능하다.

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 대학원

이상에서 서술한 바와 같이 반응용가공은 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 최근 새로운 가공법으로써 각광을 받고 있다. Sury등<sup>(1)</sup>은 반응용상태의 Sn-15%Pb합금의 변형거동을 연구하였으며, Kumar등<sup>(2)</sup>은 반응용재료의 유동거동을 입자들의 상호작용과 관련지어 수학적 모델을 제안하였다. Yoshida등<sup>(3)</sup>은 Al-4.5%Cu합금으로 단조를 행하여 유동현상과 미세조직을 관찰하였다. Gunasekera<sup>(4)</sup>는 고상입자와 액상의 기하학적인 형상을 이용하여 반응용재료의 구성방정식을 정립하였다. 강등<sup>(5)</sup>은 Toyoshima<sup>(6)</sup>가 사용한 다공질 재료의 항복조건식을 사용하여 알루미늄재료의 압축공정에 대하여 유한요소해석 결과를 실험데이터와 비교하였다. Chen등<sup>(7)</sup>은 반응용재료의 변형거동시 액상영역, 고상입자의 상호접촉에 의한 액상영역의 변형거동, 고상입자의 접촉 및 고상입자의 소성변형 등으로 구분하여 변형거동을 실험적으로 파악하였다. 지금까지 발표되어진 연구들은 반응용재료를 제조할 때 구상화의 크기가 전단응력에 미치는 영향과 소재의 특성을 파악한 것이 대부분이다. 반응용재료은 압축성형시 고상입자와 변형 때문에 응력-변형률 곡선이 기존소재의 열간압축 현상과 다르다. 압축성형시 응력이 증가하면 변형율이 계속 증가하는 것이 아니고 감소하는 현상이 일어나는 한계 변형율을 도출하는 것은 반응용단조공정의 실용화 측면에서 극히 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 단조공정에서 가장 중요한 변수인 압축속도와 고상율의 변화가 반응용재료의 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 압축실험을 수행하였다. 또한 결함이 없는 반응용단조품을 얻기 위해서는 초기 일정한 속도로 가공을 할 때 변형율의 증가에 따라서 응력이 증가되도록 성형조건을 설정하여야 한다. 이러한 성형조건을 도출하기 위하여 압축성형중 변형율이 증가하면 응력이 연속적으로 증가하는 속도변화의 관계를 제안하였다.

## 2. 실험

### 2.1 압축실험

본 실험에 사용되어진 반응용재료는 프랑스 PECHINEY에서 전자기식 교반(Electro-magnetic stirring)에 의해 제조되어진 ALTHIX(A356)재료이다. Table 1은 성분분석기를 이용하여 구한 조성을 나타낸 것이다. Fig.1에서 보여주는 바와 같이 구상화 되어진 고상입자와 액상영역이 동시에 공존하는 상태에서 압축성형하기 위하여는 원하는 고상율의 온도에서 소재의 재가열

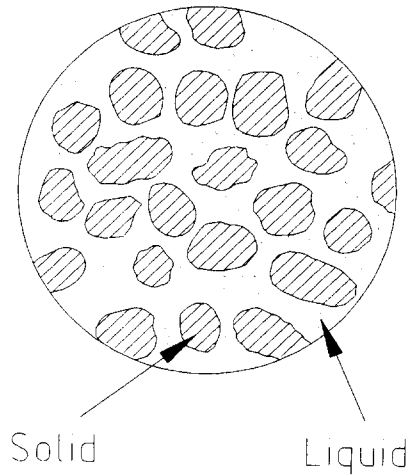


Fig. 1 Schematic representation of semi-solid state

시간이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 저자가 지금까지 연구한 결과에 의하여 584℃에서 20분간 가열한후 압축실험을 하였다.

강등<sup>(5)</sup>등의 압축실험에서는 실험장비의 제한 때문에 압축속도를 최대 44 mm/sec 이상으로 할 수가 없었다. 따라서 본연구에서는 실제로 단조공정에서 필요한 데이터를 확보하기 위하여 500 mm/sec까지 압축실험을 수행하도록 하였다.

Table 1 Chemical composition of ALTHIX(A356)

	Si	Mg	Fe	Cu	Pb+Sn	Mn	Ti	Zn	Sr	Ni
Min(%)	6.5	0.30	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Max(%)	7.5	0.40	0.15	0.03	0.03	0.03	0.20	0.05	0.05	0.03

반응용재료의 압축실험은 MTS에 전기로를 부착하여 압축시편을  $\phi 15 \times h 20$ (mm)으로 가공하여 원하는 고상율

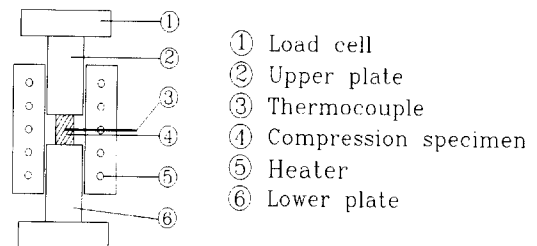
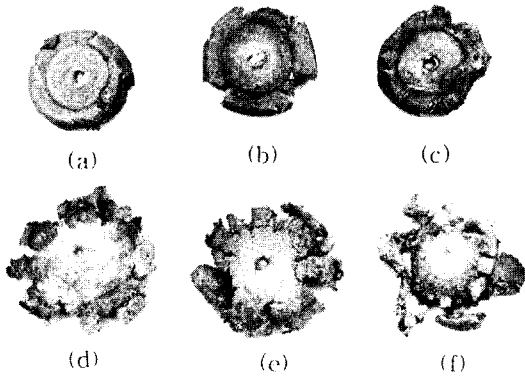
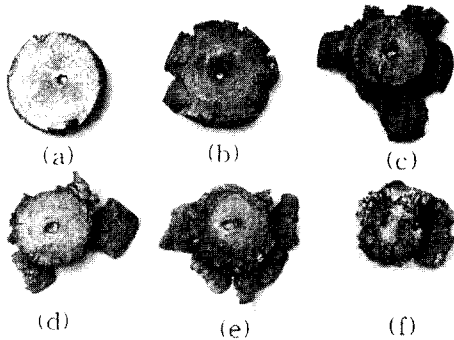


Fig. 2 Schematic diagram for compression test of semi-solid material



**Fig. 3** (a)~(f) Specimens after compression at  $f_s=50\%$   
 (a)  $V_{dic}=0.1$  mm/sec (b)  $V_{dic}=1$  mm/sec  
 (c)  $V_{dic}=10$  mm/sec (d)  $V_{dic}=100$  mm/sec  
 (e)  $V_{dic}=500$  mm/sec (f)  $V_{dic}=1000$  mm/sec

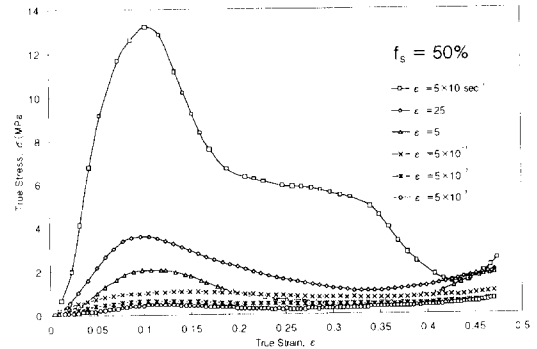


**Fig. 4** (a)~(f) Specimens after compression at  $f_s=70\%$   
 (a)  $V_{dic}=0.1$  mm/sec (b)  $V_{dic}=1$  mm/sec  
 (c)  $V_{dic}=10$  mm/sec (d)  $V_{dic}=100$  mm/sec  
 (e)  $V_{dic}=500$  mm/sec (f)  $V_{dic}=1000$  mm/sec

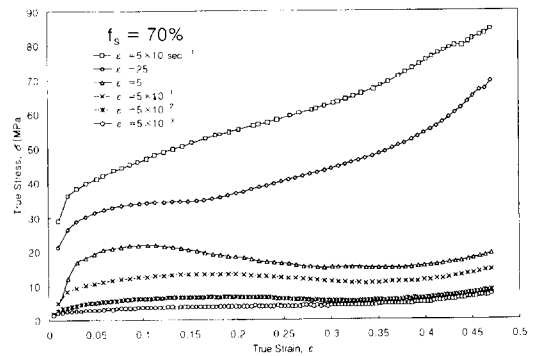
의 온도까지 상승시켜 압축실험을 행하였다. Fig.2은 압축실험을 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다.

Fig. 3 (a)~(f)는 고상율  $f_s=50\%$ (584°C)에서 다이속도를 각각  $V_{dic}=0.1, 1, 10, 100, 500, 1000$  mm/sec로 변화시켜 압축율이 60%까지 압축 하였을 때 시편의 모양을 나타낸 것이다. Fig.3 (d)~(f)에서와 같이 다이속도를 100 mm/sec이상 하였을 경우에는 고상과 액상영역간의 거시적인 분리에 의해 시편의 표면이 파단되어 있음을 관찰할 수 있다.

Fig.4 (a)~(f)는 고상율  $f_s=70\%$ (572°C)에서 속도를 변화시켜 압축 하였을 때의 시편의 모양을 나타낸 것이다. Fig.4에서 보여주는 바와 같이 액상영역과 고상영역의 거



**Fig. 5** True stress-true strain curve at solid fraction  $f_s=50\%$   
 ( $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1} \sim 5 \times 10 \text{sec}^{-1}$ )



**Fig. 6** True stress-true strain curve at solid fraction  $f_s=70\%$   
 ( $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1} \sim 5 \times 10 \text{sec}^{-1}$ )

시적인 분리현상이 Fig.3에 비하여 적게 일어남을 알 수 있었다. Fig.4(a)에서 보여주는 바와같이  $V_{dic} = 0.1$  mm/sec인 경우 열간압축에서와 같은 반경방향으로의 변형을 때문에 Fig.3(a)에 비하여 표면에 결함이 없이 단면적이 크게 증가하였다.

Fig.5은 고상율  $f_s=50\%$ 일 때, 변형률속도의 변화에 따른 응력과 진변형률과의 곡선을 나타낸 것이다. 변형률속도  $\dot{\epsilon} = V_{dic} / h$  ( $h$ : 시편의 높이,  $V_{dic}$ : 압축속도)로 정의 하였으며  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10 \text{sec}^{-1}$  ( $V_{dic} = 1000$  mm/sec)일 때에는 Fig.3(f)에서 보여주는 바와 같이 압축후 재료의 표면에 분리현상이 현저하게 관찰되었다. 반응용재료의 변형특성으로서는 응력이 증가하다가 변형률이 특정한 값 ( $\epsilon=0.1$ ) 이후 부터는 응력이 감소하는 현상은 변형률속도가 증가할수록 현저하게 관찰되었다. 위의 원인은 초기에는 조직의 치밀화 및 액상의 유동을 유발시키기 위하여 하중이 증가하지만 변형률이 어느 정도 되면서부터는 액

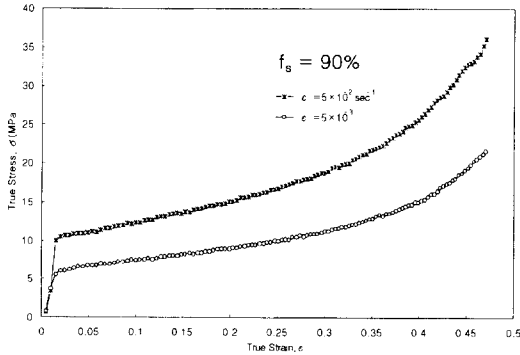
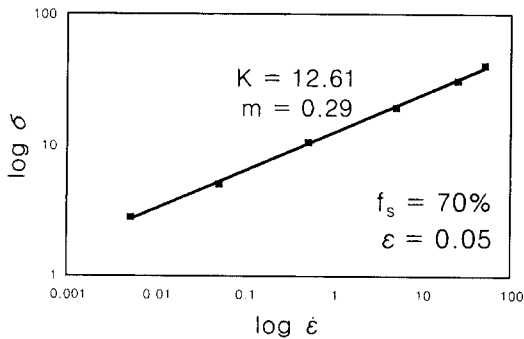
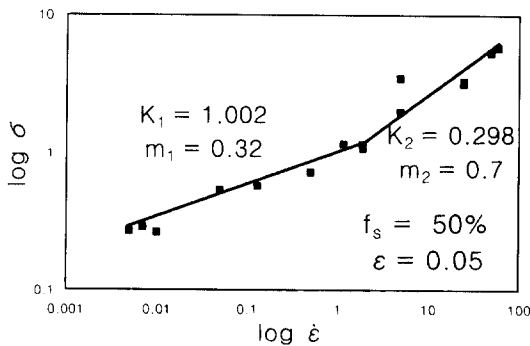


Fig. 7 True stress-true strain curve at solid fraction  $f_s=90\%$

상의 유동이 일어나기 시작하여 자유표면쪽으로 이동하기 때문이다. 액상의 유동현상 때문에 시편표면에서 균열발생 및 고상과 액상의 분리현상으로 인하여 하중이 감소하다가 재료의 조직이 어느 정도 치밀화 되면서부터는 고상



(a) Solid fraction  $f_s=70\%$



(b) Solid fraction  $f_s=50\%$

Fig. 8 Relationship between  $\log \sigma$  and  $\log \dot{\epsilon}$  at solid fraction  $f_s=50\%$  and  $70\%$  ( $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ )

영역이 소성변형이 되기 때문에 하중이 증가된 것으로 사료된다. 반용융재료의 압축실험은 액상유동에 의하여 시편 표면쪽으로 유출되어 시편의 표면이 압축공간에 떨어져 나가는 현상이 관찰되었다.

Fig.6는 고상율  $f_s=70\%$ 일 때 변형률속도의 변화에 따른 응력과 진변형률과의 관계를 나타낸 것이다. 변형률속도가  $\dot{\epsilon}=5 \times 10^2 \text{sec}^{-1}$ 와  $25 \text{sec}^{-1}$ 의 경우는 반용융재료의 거동이 나타나지 않고 변형률의 증가함에 따라 응력이 계속 증가하는 열간압축시편의 응력-변형률의 관계를 보여주고 있다. 고상율 70%에서는 변형률속도가  $5 \text{sec}^{-1}$  이하에서는 변형률이 증가함에 따라서 응력이 증감하는 반용융재료의 변형 특성을 보여주고 있다. 이것은 액상영역이  $f_s=50\%$ 에 비하여 작기 때문에 고상입자의 소성변형거동이 변형률 속도에 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig.7은 고상율  $f_s=90\%$ 에서 변형률속도  $\dot{\epsilon}=5 \times 10^2$ ,  $5 \times 10^3 \text{sec}^{-1}$ 일 때의 응력-변형률곡선을 나타낸 것이다. 변형률속도는 작지만 반용융재료의 특성은 관찰되지 않았다. 고상율이 90%인 경우는 응력과 변형률의 관계식이 거의 열간 압축실험결과와 같이 변형률이 증가하면 응력이 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다.

Fig.8(a),(b)은 고상율이 각각  $f_s=70\%$ 와  $f_s=50\%$ 에서 압축실험결과를 이용하여 유동응력식  $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ 의 K와 m의 계수를 알기 위하여 응력-변형률속도의 관계를 대수좌표계 ( $\log \dot{\epsilon} - \log \sigma$ )의 관계를 이용하여 나타낸 것이다. Fig.8(b)의  $f_s=50\%$ 는 불연속점이 생겨 구간을 나누어 선형회귀로써 구한 K와 m값은 다음과 같다.

(i)  $f_s = 50\%$  :

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m : K = 1.01, m = 0.32 (\dot{\epsilon} \leq 5 \text{ sec}^{-1})$$

$$K = 0.30, m = 0.71 (\dot{\epsilon} > 5 \text{ sec}^{-1})$$

(ii)  $f_s = 70\%$  :

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m : K = 12.61, m = 0.29$$

## 2.2 거시적인 거동관찰

반용융재료의 압축거동을 파악하기 위해서는 압축전 재료의 구상화 정도를 관찰하여야 한다. Fig.9는 재가열 유지시간을 15분으로 한후 담금질한 시편의 조직사진으로 구상화가 대체적으로 잘 되어 있음을 알 수 있다. Fig.9의 조직상태를 가진 소재가 압축되어 질 때 구상화의 변형거동을 관찰하기 위하여 압축변위에 따라서 조직을 관찰하였다.

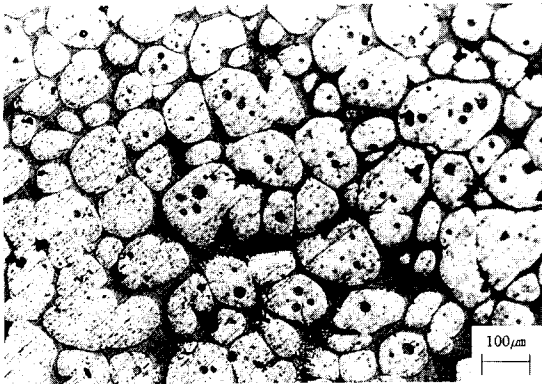


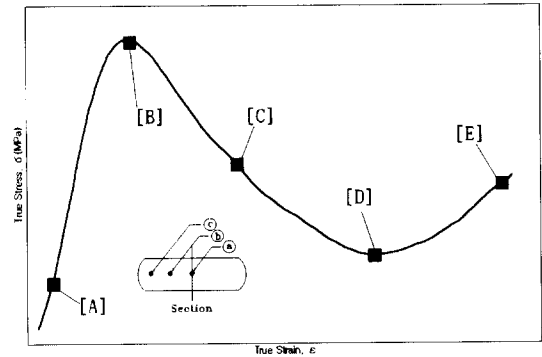
Fig. 9 Microstructure after heating process to compression test

Fig.10 (a)는 압축속도가  $V_{die} = 500$  mm/sec, 고상율  $f_s = 50\%$ 인 경우 압축성형시 반응용재료의 응력과 변형을 선도이며 [A]~[E]는 각 지점에서 조직사진을 관찰하기 위한 위치를 나타낸 것이다. Fig.10 (b)는 압축변위에 따른 시편의 조직사진을 나타낸 것이다. Fig.10 (b)의 [A], [B]는 변위가 각각 1, 2 mm일 때 압축시편에 대한 단면의 조직사진이다. 고상입자의 변형으로 인하여 조직의 치밀화가 보이며 액상이 유동한 흔적은 나타나지 않았다. 또 액상과 고상입자와의 경계인 결정립이 뚜렷하지 않다. 압축시험편의 표면부분인 ㉓에서도 액상이 빠져나간 기공이 거의 관찰되지 않았다. Fig.10 (b)의 [C], [D]는 변위가 각각 5, 8 mm일 때의 조직사진이다. Fig.10 (b)의 [A], [B]와는 달리 액상의 유동이 일어나 바깥부분 ㉓에서부터 액상이 빠져나간 기공이 관찰 되었다. 변위가 2~8 mm에서 하중이 감소하는 이유는 Fig.5의 임계변형율  $\epsilon_{cr} = 0.1$ 까지는 액상의 유동이 일어나지 않으나, Fig.10 (b)의 [C], [D]에서 보여주는 바와같이 임계변형율을 넘어서면서부터는 액상의 유동이 일어나기 때문이다.

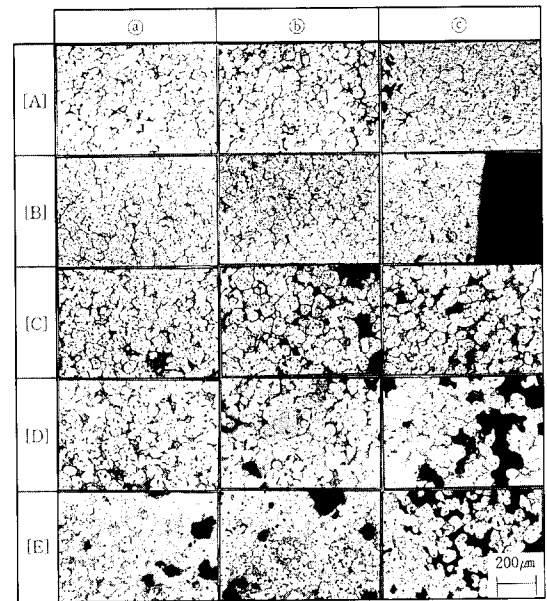
Fig.10 (b)의 [E]는 변위가 12 mm일 때의 조직사진이다. ㉓부분에서는 액상영역들이 소재의 표면쪽으로 유출되어 고상입자들만이 밀착되어있다. 특히 ㉓부분에서는 고상입자만 남고 액상이 유출되어 기공들이 많이 관찰되었다.

Fig.11는 다이속도를  $V_{die} = 10, 100, 500, 1000$  mm/sec로 하였을 때 높이 감소를  $\gamma = 60\%$ 에 대한 원주 시편의 조직사진을 나타낸 것이다. 다이속도가 빠를수록 고상입자들의 분포가 균일해지고 단조후에 나타나는 조직처럼 결정립이 아주 미세함을 알수 있다.

이상과 같은 조직사진의 관찰을 통하여 반응용재료의



(a) Stress-strain curve and position to investigation of microstructure



(b) Microstructure phenomena for variation displacement

Fig. 10 Relationship between deformation behavior and microstructure variation

압축기구를 Fig.12와 같이 나타낼 수가 있다.

반응용재료를 압축할 때에는 Fig.12에서 보여주는 바와 같이 초기에는 다이주위의 고상성분만이 변형을 하다가 임계변형율에 이르게 되면 액상성분들이 점차적으로 표면부위로 유동을 하게 된다. 이때 부터 표면부위에 있는 액상영역들이 소재표면으로 유출하게 된다. 고상입자와 액상이 동시에 유동을 하면서 부터는 응력이 감소하게 된다. 다이부위의 고상성분들만 변형이 계속되면서 응력이 계속 증가됨을 알 수 있다. 위의 원인은 다이부위에 있어서 반

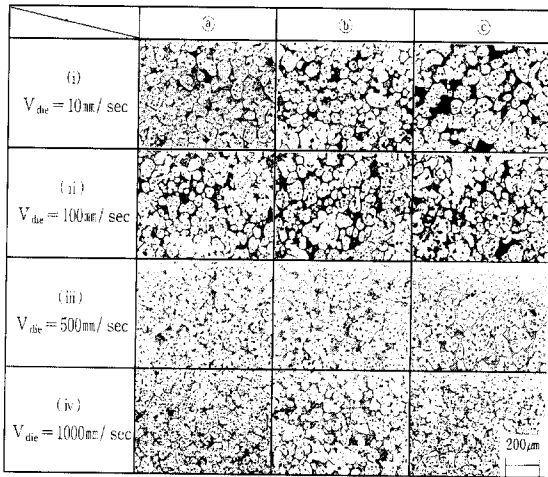


Fig. 11 Evolution of the microstructure of semi-solid alloy after upsetting for variation of die speed

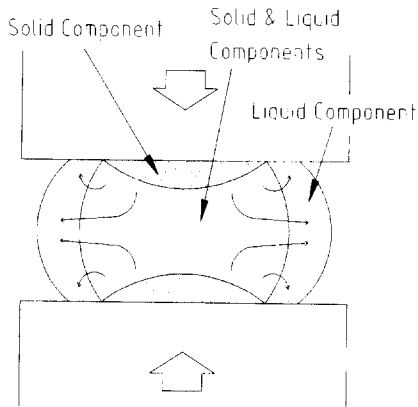


Fig. 12 Schematic diagram at upsetting behavior

용융재료의 온도가 열전달 현상으로 인하여 초기온도보다 낮아 응고가 빨리 일어나기 때문이다. Fig.13(a)~(b)은 다이속도가 각각  $V_{die} = 10 \text{ mm/sec}$ ,  $100 \text{ mm/sec}$  일 때 시편을 절단한 후 확대하여 거시적으로 관찰한 사진이다. Fig.12에서 보여주는 바와 같이 다이와 접촉하는 부위에서는 고상영역만이 변형이 되어 있고, 소재의 중앙부분에서는 액상영역과 고상입자들이 자유표면쪽으로 유동하는 것을 알 수 있으며, 가장 바깥에 있는 소재가 표면으로부터 분리됨을 알 수가 있다.

Fig.13(a), (b)에서 보여주는 바와 같이 다이속도가 증가할수록 Fig.11에서 보여주는 바와 같이 고상입자가 균

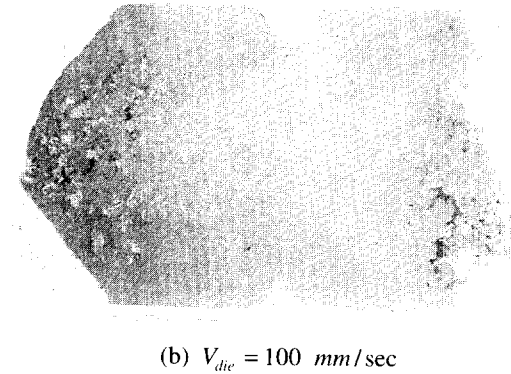
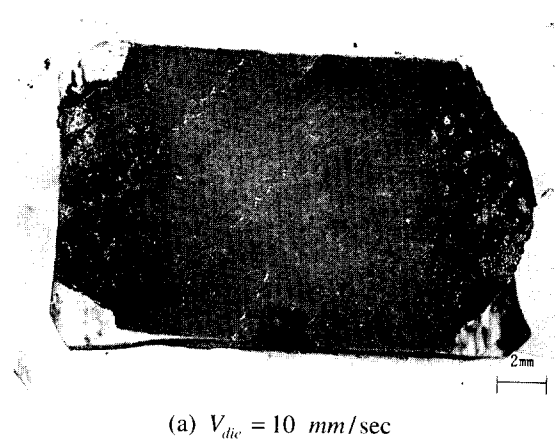


Fig. 13 (a)~(b) The macroscopic photo of cross-section for compressed specimen at solid fraction  $f = 50\%$

일하게 분포되어 거시적인 분리가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 반응용재료를 이용하여 임의형상의 부품을 성형하고자 할 때  $100 \text{ mm/sec}$  이상의 속도로 가공을 하면 액상영역들이 기공들을 메워주는 역할을 하게 되어 표면결함을 제거해줄 것으로 생각된다.

반응용재료를 압축성형 할 때는 변형율의 증가에 따라서 응력이 증감된다. 그러나 구상화조직을 가지고 있지 않은 소재의 열간단조 및 압축성형의 경우는 변형율의 증가에 따라서 응력이 증가되어 급형내부에 소재를 충전시킬 수 있다. 일정한 속도로 압축되어질 때 변형율 속도를 변화시켜 응력이 연속적으로 증가되는 속도증분의 값은 단조공정에 있어서 대단히 중요하다. 따라서 반응용소재를 이용하여 성형을 할 때도 변형율의 증가에 따라서 응력이 증가되도록 성형도중 변형율 속도를 변화시켜야 한다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 압축실험중 속도를 변화시

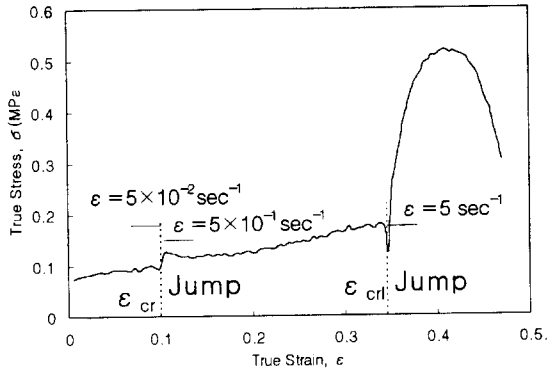


Fig. 14 True stress-true strain curve at jumping strain rate  
 ( $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1} \rightarrow \dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1} \rightarrow \dot{\epsilon} = 5 \text{ sec}^{-1}$ )

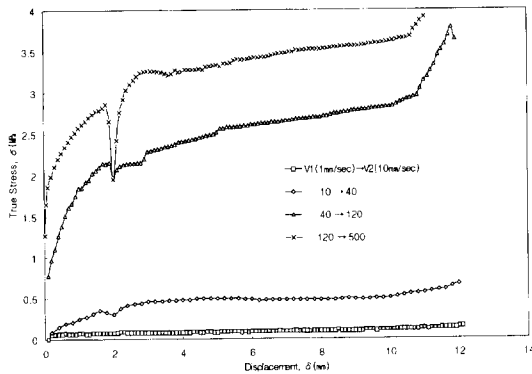


Fig. 15 True stress-true strain curves at jumping strain rate

켜 변형율이 증가함에 따라 응력이 연속적으로 증가되는 속도를 조사하였다.

Fig. 14은 변형율  $\epsilon = 0.1$ 에서 변형율속도를  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2}$ 에서  $5 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ 로 증가시켰을때 응력이 연속적으로 증가하였다. 변형율  $\epsilon = 0.35$ 일때 변형율속도가  $5 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ 에서  $5 \text{ sec}^{-1}$ 로 변화한 경우 응력이 불연속적으로 증가하였다. Fig. 14에서 보여주는 바와같이  $\epsilon_{cr} = 0.1$ 에서 변형율속도를 증가시켰을때 응력이 연속적으로 증가되는 변형율속도를 규명하고자 한다. Fig. 15은 반응용재료의 압축실험에서 변형율  $\epsilon = 0.1$ 에서 응력이 일정하게 증가하게끔 변형율속도를 변화시켜 얻은 응력-변형율곡선이다. 변위  $\delta = 2 \text{ mm}$ 까지 압축할 때는 가압속도( $V_1$ )을 1, 10, 40, 120 mm/sec으로 유지,  $\delta > 2 \text{ mm}$  이후부터는 왕복속도( $V_2$ )을 각각 10, 40, 120, 500 mm/sec로 증가시켰을때 연속적으로 응력이

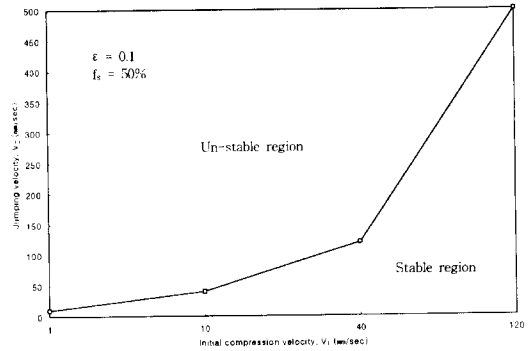


Fig. 16 The relationship of  $V_1$  and  $V_2$  at jumping strain rate

증가함을 Fig. 15로부터 알 수 있었다. 특히 다이속도 120 → 500 mm/sec로 변화시킬 때 변위가 2 mm인 부분에서는 응력이 감소하다가 다시 증가하는 이유는 다이의 속도가 고속으로 변환되기 때문에 속도제어에 필요한 시간상의 오차로 생각된다.

Fig. 16은 변형율을 증가할 때 응력이 연속적으로 증가하기 위하여 초기속도  $V_1$ 과 이에 대응한 속도  $V_2$ 와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 16에서 완전한 영역과 불안정한 영역은 변형율의 증가와 더불어 응력이 연속 및 불연속적으로 증가되는 초기속도( $V_1$ )에 대한 증가속도( $V_2$ )의 관계를 만족하는 영역이다. 변형율  $\epsilon = 0.1$ 에서 변형율의 증가와 더불어 응력이 연속적으로 증가되기 위한 속도( $V_2$ )은 초기속도의 증가와 더불어 비선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 단조공정중 속도변화의 범위는 Fig. 16에서 보여주는 바와같이 안전한 영역범위내에서 행하는 것이 결함이 없는 제품을 제조할 수 있을 것으로 사료한다.<sup>(8)</sup>

### 3. 결론

반용용 알루미늄재료를 압축성형할때 변형율 속도변화를 고려한 거시적인 조직변화와 변형거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 반응용재료의 압축거동시에 나타나는 거시적인 조직변화를 관찰한 결과 가압속도가 증가할수록 균일한 조직현상을 얻을 수 있었다.
- (2) 반응용재료의 압축성형시에 액상의 유출로 인하여 고상영역과 액상영역간의 거시적인 분리가 나타나고, 중심부위에서는 조직의 치밀함을 관찰할 수 있었고, 가압속

도가 증가할수록 액상이 제품표면 쪽으로 유출된 기공들이 적게 관찰되어졌다.

(3) 압축성형시 변형율 0.1에서 변형률속도를 변화시켰을 경우 응력이 연속적으로 증가하였다.

(4) 변형율의 증가와 더불어 응력이 증감되는 변형율은 변형률속도에 무관하며, 변형률속도가  $25 < \dot{\epsilon} < 5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 인 경우 변형율 0.1과 0.35에서 범위에서 응력이 증감되는 현상이 관찰되었다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원에 의한 연구의 일부분입니다.

## 참고문헌

- (1) M.Su ry and M.C.Flemings, 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys", Metall. Trans., Vol.13A, pp.1809~1819.
- (2) P.Kumar, C.L.Martin and S.Brown, 1994, "Predicting the Constitutive Flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries", The 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp.37~46.
- (3) C.Yoshida, M.Moritaka, S.Shinya, K.Takebayashi and A.Nanba, 1992, "Semi-Solid Forging of Aluminum Alloys", The 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, p.95.
- (4) J.S.Gunasekera, 1992, "Development of a Constitutive Model for Mushy (Semi-solid) Materials", The 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp.211~222.
- (5) 강충길, 윤종훈, 1996, "반응용재료의 압축거동 및 액상의 유동을 고려한 유한요소해석", 대한기계학회 논문집 제20권 제12호, pp.3715~3725.
- (6) S.Toyoshima, 1994, "A FEM Simulation of Densification in Forming Processes for Semi-Solid Materials", The 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp.47~62.
- (7) C.P.Chen and C-Ya Tsao, 1996, "Semi-Solid Deformation of A356 Al alloys", The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp.16~20.
- (8) C.G.Kang, J.S.Choi, D.W.Kang, 1997, "Effect of Gate Shape and Forging Temperature on the Mechanical Properties in Injection Forging Process of Semi-Solid Aluminum Material", J. of Materials processing Technology to be accepted (In press)